

Prüfungsklausur Mess- und Regelungstechnik 1 (MRT1)

Prof. Dr.-Ing. O. Nelles
Institut für Mechanik und Regelungstechnik
Universität Siegen

3. Februar 2010

Name:	Punkte	A1	A2	A3	A4	Gesamt
Mat.-Nr.:	Soll:	20	20	30	30	100
Note:	Ist:					

Aufgabe 1: Verständnisfragen

Bei den nachfolgenden Fragen sind die richtigen Antworten deutlich zu kennzeichnen.

Jede Frage hat entweder eine oder zwei richtige Antworten!

Für jede richtige Antwort gibt es einen Punkt. Wird bei einer Frage eine richtige und eine falsche Antwort angekreuzt, gibt es für diese Frage keinen Punkt.

- a) Woran erkennt man, ob ein System globales P-, I- oder D-Verhalten hat?
- ☐ Am Verlauf der Sprungantwort für $t \rightarrow \infty$.
 - ☐ Am Verlauf des Frequenzgangs für $\omega \rightarrow 0$.
 - ☐ Am Verlauf des Frequenzgangs für $\omega \rightarrow \infty$.
- b) Was möchte man beim Entwurf eines Kompensationsreglers erreichen?
- ☐ Dass sowohl die Pole als auch die Nullstellen des geschlossenen Regelkreises vorgegebene Werte annehmen.
 - ☐ Dass ausschließlich die Pole des geschlossenen Regelkreises an die gewünschte Stelle verschoben werden.
 - ☐ Dass der Regler den Störgrößeneinfluss kompensiert.
- c) Warum wird der Amplitudenverlauf im Bodediagramm doppelt logarithmisch aufgetragen?
- ☐ Weil der Verlauf dann näherungsweise mit linearen Asymptoten dargestellt werden kann.
 - ☐ Weil die Parallelschaltung mehrerer Übertragungsglieder einer einfachen Addition der Amplitudengänge entspricht.
 - ☐ Weil die Reihenschaltung mehrerer Übertragungsglieder einer einfachen Addition der Amplitudengänge entspricht.

- d) Was gilt für Nullstellen einer Übertragungsfunktion?
- ☐ Systeme, die mindestens eine (instabile) Nullstelle mit positivem Realteil aufweisen, werden als nichtphasenminimal bezeichnet.
 - ☐ Nullstellen entstehen in der Regel durch die Zusammenfassung von Parallelschaltungen zu einer einzigen Übertragungsfunktion.
 - ☐ Die Lage der Nullstellen ist entscheidend für die Stabilität der Übertragungsfunktion.
- e) Unter welchen Voraussetzungen ist sichergestellt, dass unter Annahme eines stabilen Reglerentwurfs der Regelfehler bei einer rampenförmigen Führungsgröße für $t \rightarrow \infty$ gegen Null strebt?
- ☐ Wenn nur die Regelstrecke einen I-Anteil aufweist (globales I-Verhalten).
 - ☐ Wenn sowohl die Regelstrecke als auch der Regler einen I-Anteil aufweisen.
 - ☐ Wenn nur der Regler einen I-Anteil aufweist (z.B. PI- oder PID-Regler).
- f) Welche Aussagen zur Wurzelortskurve sind richtig?
- ☐ Die Pole des geschlossenen Regelkreises sind die Nullstellen des charakteristischen Polynoms.
 - ☐ Die WOK stellt die Orte in der s-Ebene dar, wo die Pole des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit der Reglerverstärkung liegen können.
 - ☐ Die WOK stellt die Orte in der s-Ebene dar, wo die Pole des offenen Regelkreises in Abhängigkeit der Reglerverstärkung liegen können.
- g) Wodurch ist sichergestellt, dass die Regelgröße $y(t)$ der Führungsgröße $w(t)$ möglichst gut folgt?
- ☐ Die Führungsübertragungsfunktion sollte möglichst klein sein.
 - ☐ Die Führungsübertragungsfunktion sollte möglichst gleich Eins sein.
 - ☐ Die Führungsübertragungsfunktion sollte möglichst groß sein.
- h) Was bedeutet Rückkopplung in der Regelungstechnik?
- ☐ Wirkung der Stellgröße auf die Regelgröße.
 - ☐ Wirkung der Regelgröße auf die Stellgröße.
 - ☐ Wirkung der Regelgröße auf die Störgröße.
- i) Ein Polvorgaberegler...
- ☐ ... wird so entworfen, dass die **Pole** des geschlossenen Regelkreises bestimmte Werte annehmen.
 - ☐ ... wird so entworfen, dass die **Pole und Nullstellen** des geschlossenen Regelkreises bestimmte Werte annehmen.
 - ☐ ... kann bei instabilen Regelstrecken nicht verwendet werden.

- j) Wofür ist die Frequenzgangsortskurve besonders geeignet?
- ☐ Zur Ermittlung von Amplitude und Phasenverschiebung bei einer bestimmten Kreisfrequenz.
 - ☐ Um die Lage der Pole des geschlossenen Regelkreises abzulesen.
 - ☐ Um die Stabilität des geschlossenen Regelkreises zu analysieren.
- k) Ein Vorfilter kann eingesetzt werden, um die bleibende Regelabweichung ohne I-Anteil im offenen Regelkreis zu beseitigen. Was ist dabei zu beachten?
- ☐ Beim Einsatz des Vorfilters müssen die Verstärkungen von Regler und Strecke exakt bekannt sein.
 - ☐ Der Vorfilter kann nicht zur Störgrößenkompensation benutzt werden.
 - ☐ Der Vorfilter kann zur Störgrößenkompensation benutzt werden.
- l) Welche Aussagen treffen für das Nyquist-Kriterium zu?
- ☐ Die Stabilität des geschlossenen Regelkreises wird anhand der Ortskurve des offenen Regelkreises überprüft.
 - ☐ Das Nyquist-Kriterium ist nur für Systeme anwendbar, die nicht totzeitbehaftet sind.
 - ☐ Man benötigt kein mathematisches Modell der Strecke, wenn die Ortskurve des offenen Regelkreises experimentell bestimmt wird.
- m) Welche Forderungen bzw. Annahmen müssen an die Transformation eines Zeitsignals in den Frequenzbereich gestellt werden?
- ☐ Das Zeitsignal muss periodisch sein.
 - ☐ Alle praktisch relevanten Signale müssen transformierbar sein.
 - ☐ Die Signale sind Null für $t < 0$.

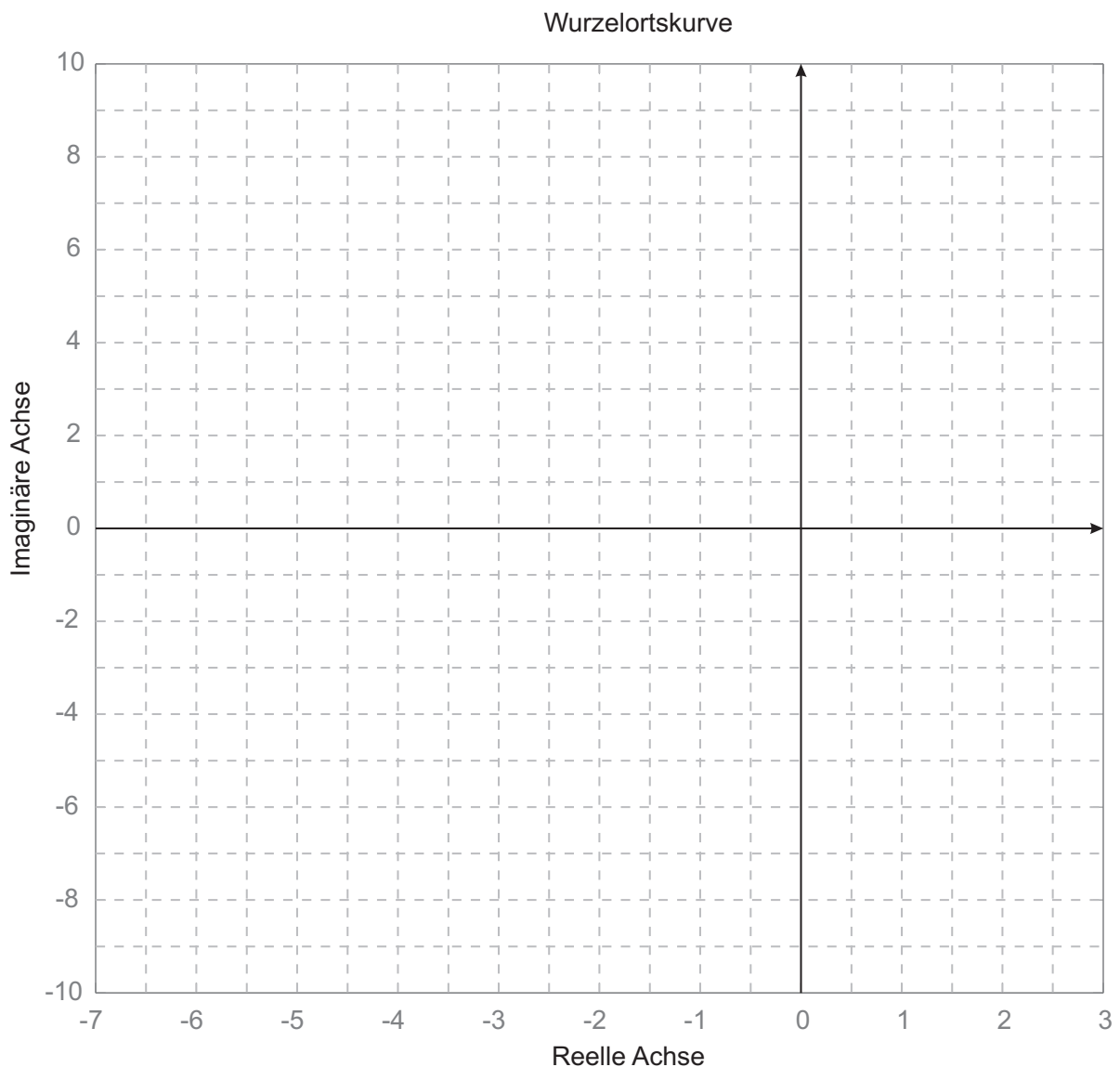
Aufgabe 2: Konstruktion einer Wurzelortskurve

Für einen gegebenen offenen Regelkreis mit der Übertragungsfunktion:

$$G_0(s) = K \cdot \frac{s + 5}{(s + 2) \cdot (s^2 + 2s + 2)}$$

soll die Wurzelortskurve konstruiert werden.

- Geben Sie die Pole und Nullstellen von $G_0(s)$ an. Geben Sie an, ob der offene Regelkreis stabil ist und warum.
- Berechnen Sie die Asymptotenwinkel Ψ_l und den Asymptotenschnittpunkt s_A .
- Skizzieren Sie die Wurzelortskurve in das vorbereitete Diagramm. Tragen Sie alle zuvor berechneten Größen ein. Beachten Sie die Achsenskalierung!
- Kann der geschlossene Regelkreis durch die Wahl einer Verstärkung $K > 0$ instabil werden? Begründen Sie ihre Antwort. Markieren Sie die kritische Verstärkung K_{krit} in der Skizze der WOK.



Aufgabe 3: Stabilität eines Regelkreises

Gegeben sind eine Regelstrecke $G_S(s)$ und ein Regler $G_R(s)$ mit den Übertragungsfunktionen:

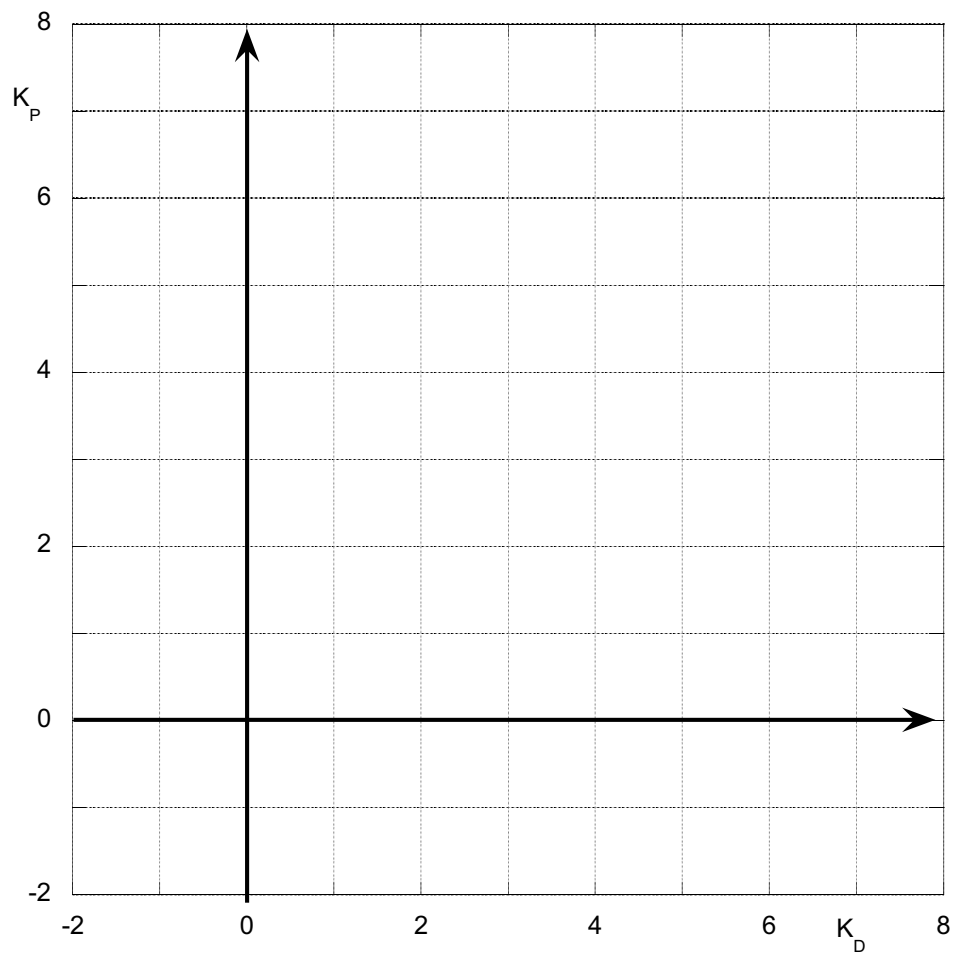
$$G_S(s) = \frac{s - 0,5}{(s - 1,5)(s - 2)} \quad G_R(s) = K_P + K_D \cdot s$$

- a) Wie heißt der verwendete Reglertyp?
- b) Begründen Sie, warum die Regelstrecke sowohl instabil als auch nichtphasenminimal ist.
- c) Warum ist bei dieser Regelstrecke zu erwarten, dass sich ein sehr eingeschränkter Stabilitätsbereich für die Reglerparameter K_P und K_D ergibt?
- d) Berechnen Sie die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises $G_W(s)$:

$$G_W(s) = \frac{Z_0(s)}{N_0(s) + Z_0(s)} \quad \text{mit: } G_0(s) = G_R(s) \cdot G_S(s) = \frac{Z_0(s)}{N_0(s)}$$

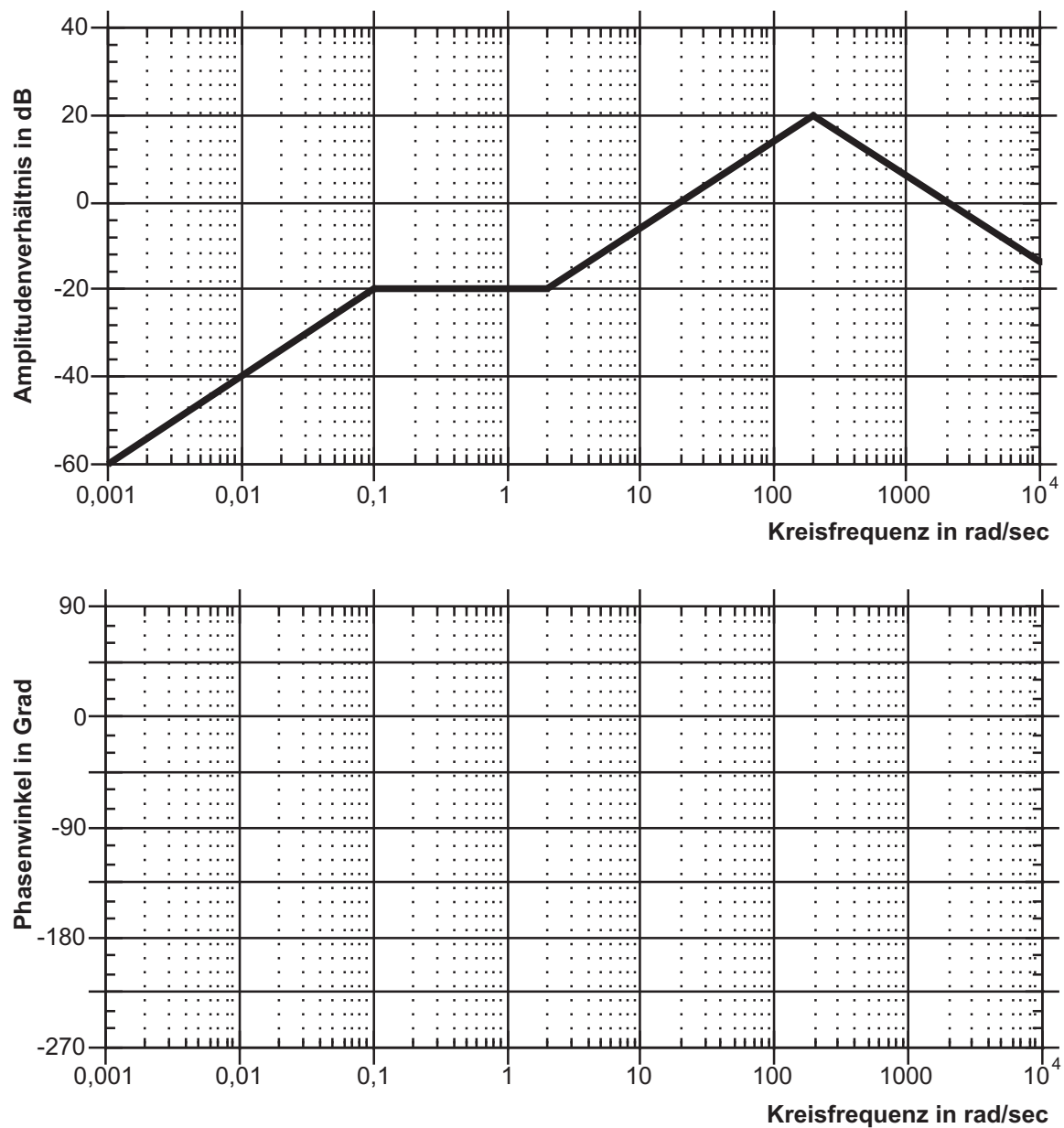
- e) Bestimmen Sie mit Hilfe des Hurwitz-Kriteriums, in welchen Wertebereichen von K_P und K_D der geschlossene Regelkreis stabil ist. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in das vorbereitete Stabilitätsdiagramm (siehe nächste Seite) ein und kennzeichnen Sie deutlich den stabilen Bereich.
- f) Berechnen Sie mit Hilfe des Endwertsatzes den stationären Endwert des geregelten Systems bei Anregung durch einen Führungssprung $w(t) = \sigma(t)$ in Abhängigkeit der Reglerparameter.
- g) Aus der Gleichung für den Endwert fällt der Parameter K_D heraus, nur K_P bleibt erhalten. Begründen Sie an Hand der verwendeten Reglerstruktur, warum das so sein muss.
- h) Begründen Sie, warum das stationäre Verhalten nicht zufrieden stellend ist. Wie könnte es verbessert werden?

Stabilitätsdiagramm für Aufgabenteil e):



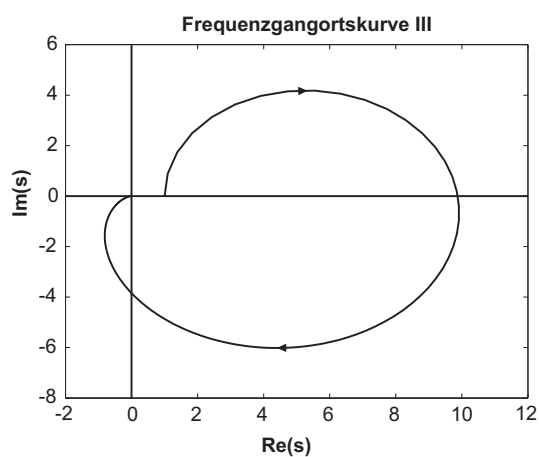
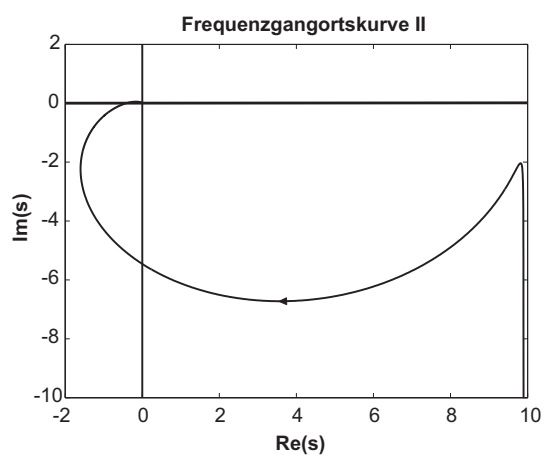
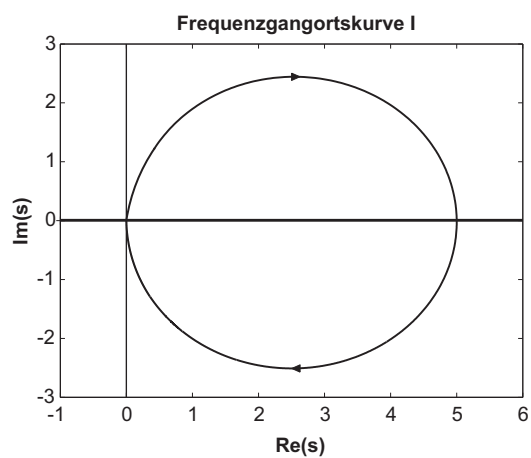
Aufgabe 4: Frequenzgang einer Übertragungsfunktion

Gegeben ist der asymptotische Amplitudengang eines phasenminimalen Systems:



- Ermitteln Sie die Eckfrequenzen, Asymptotensteigungen sowie die Verstärkung des Systems.
- Bestimmen Sie die Übertragungsfunktion $G(s)$ und benennen Sie die Teilmultiplikatoren.
- Zeichnen Sie den asymptotischen Phasengang in das oben stehende Bodediagramm ein.

- d) Erklären Sie bei jeder Frequenzgangortskurve, welches globale Verhalten vorliegt. Ordnen Sie der Übertragungsfunktion $G(s)$ die passende Frequenzgangortskurve zu und begründen Sie Ihre Wahl.



- e) Nennen Sie 3 Merkmale, woran Sie erkennen, dass das System $G(s)$ globales D-Verhalten hat (logarithmische Frequenzkennlinien, Übertragungsfunktion, Frequenzgangortskurve).

Lösungen:

Aufgabe 1: Verständnisfragen

Bei den nachfolgenden Fragen sind die richtigen Antworten deutlich zu kennzeichnen.

Jede Frage hat entweder eine oder zwei richtige Antworten!

Für jede richtige Antwort gibt es einen Punkt. Wird bei einer Frage eine richtige und eine falsche Antwort angekreuzt, gibt es für diese Frage keinen Punkt.

- a) Woran erkennt man, ob ein System globales P-, I- oder D-Verhalten hat?
- ☒ Am Verlauf der Sprungantwort für $t \rightarrow \infty$.
 - ☒ Am Verlauf des Frequenzgangs für $\omega \rightarrow 0$.
 - ☐ Am Verlauf des Frequenzgangs für $\omega \rightarrow \infty$.
- b) Was möchte man beim Entwurf eines Kompensationsreglers erreichen?
- ☒ Dass sowohl die Pole als auch die Nullstellen des geschlossenen Regelkreises vorgegebene Werte annehmen.
 - ☐ Dass ausschließlich die Pole des geschlossenen Regelkreises an die gewünschte Stelle verschoben werden.
 - ☐ Dass der Regler den Störgrößeneinfluss kompensiert.
- c) Warum wird der Amplitudenverlauf im Bodediagramm doppelt logarithmisch aufgetragen?
- ☒ Weil der Verlauf dann näherungsweise mit linearen Asymptoten dargestellt werden kann.
 - ☐ Weil die Parallelschaltung mehrerer Übertragungsglieder einer einfachen Addition der Amplitudengänge entspricht.
 - ☒ Weil die Reihenschaltung mehrerer Übertragungsglieder einer einfachen Addition der Amplitudengänge entspricht.

- d) Was gilt für Nullstellen einer Übertragungsfunktion?
- ☒ Systeme, die mindestens eine (instabile) Nullstelle mit positivem Realteil aufweisen, werden als nichtphasenminimal bezeichnet.
 - ☒ Nullstellen entstehen in der Regel durch die Zusammenfassung von Parallelschaltungen zu einer einzigen Übertragungsfunktion.
 - ☐ Die Lage der Nullstellen ist entscheidend für die Stabilität der Übertragungsfunktion.
- e) Unter welchen Voraussetzungen ist sichergestellt, dass unter Annahme eines stabilen Reglerentwurfs der Regelfehler bei einer rampenförmigen Führungsgröße für $t \rightarrow \infty$ gegen Null strebt?
- ☐ Wenn nur die Regelstrecke einen I-Anteil aufweist (globales I-Verhalten).
 - ☒ Wenn sowohl die Regelstrecke als auch der Regler einen I-Anteil aufweisen.
 - ☐ Wenn nur der Regler einen I-Anteil aufweist (z.B. PI- oder PID-Regler).
- f) Welche Aussagen zur Wurzelortskurve sind richtig?
- ☒ Die Pole des geschlossenen Regelkreises sind die Nullstellen des charakteristischen Polynoms.
 - ☒ Die WOK stellt die Orte in der s-Ebene dar, wo die Pole des geschlossenen Regelkreises in Abhängigkeit der Reglerverstärkung liegen können.
 - ☐ Die WOK stellt die Orte in der s-Ebene dar, wo die Pole des offenen Regelkreises in Abhängigkeit der Reglerverstärkung liegen können.
- g) Wodurch ist sichergestellt, dass die Regelgröße $y(t)$ der Führungsgröße $w(t)$ möglichst gut folgt?
- ☐ Die Führungsübertragungsfunktion sollte möglichst klein sein.
 - ☒ Die Führungsübertragungsfunktion sollte möglichst gleich Eins sein.
 - ☐ Die Führungsübertragungsfunktion sollte möglichst groß sein.
- h) Was bedeutet Rückkopplung in der Regelungstechnik?
- ☐ Wirkung der Stellgröße auf die Regelgröße.
 - ☒ Wirkung der Regelgröße auf die Stellgröße.
 - ☐ Wirkung der Regelgröße auf die Störgröße.
- i) Ein Polvorgaberegler...
- ☒ ... wird so entworfen, dass die **Pole** des geschlossenen Regelkreises bestimmte Werte annehmen.
 - ☐ ... wird so entworfen, dass die **Pole und Nullstellen** des geschlossenen Regelkreises bestimmte Werte annehmen.
 - ☐ ... kann bei instabilen Regelstrecken nicht verwendet werden.

- j) Wofür ist die Frequenzgangsortskurve besonders geeignet?
- ☐ Zur Ermittlung von Amplitude und Phasenverschiebung bei einer bestimmten Kreisfrequenz.
 - ☐ Um die Lage der Pole des geschlossenen Regelkreises abzulesen.
 - ☒ Um die Stabilität des geschlossenen Regelkreises zu analysieren.
- k) Ein Vorfilter kann eingesetzt werden, um die bleibende Regelabweichung ohne I-Anteil im offenen Regelkreis zu beseitigen. Was ist dabei zu beachten?
- ☒ Beim Einsatz des Vorfilters müssen die Verstärkungen von Regler und Strecke exakt bekannt sein.
 - ☒ Der Vorfilter kann nicht zur Störgrößenkompensation benutzt werden.
 - ☐ Der Vorfilter kann zur Störgrößenkompensation benutzt werden.
- l) Welche Aussagen treffen für das Nyquist-Kriterium zu?
- ☒ Die Stabilität des geschlossenen Regelkreises wird anhand der Ortskurve des offenen Regelkreises überprüft.
 - ☐ Das Nyquist-Kriterium ist nur für Systeme anwendbar, die nicht totzeitbehaftet sind.
 - ☒ Man benötigt kein mathematisches Modell der Strecke, wenn die Ortskurve des offenen Regelkreises experimentell bestimmt wird.
- m) Welche Forderungen bzw. Annahmen müssen an die Transformation eines Zeitsignals in den Frequenzbereich gestellt werden?
- ☐ Das Zeitsignal muss periodisch sein.
 - ☒ Alle praktisch relevanten Signale müssen transformierbar sein.
 - ☒ Die Signale sind Null für $t < 0$.

Aufgabe 2: Konstruktion einer Wurzelortskurve

a) Der offene Regelkreis ist stabil, da alle Pole einen negativen Realteil besitzen:

$$n = 3 \text{ Pole:} \quad p_1 = -2 \quad p_2 = -1 + i \quad p_3 = -1 - i$$

$$m = 1 \text{ Nullstelle:} \quad n_1 = -5$$

b) Die Wurzelortskurve hat $n - m = 2$ Asymptoten:

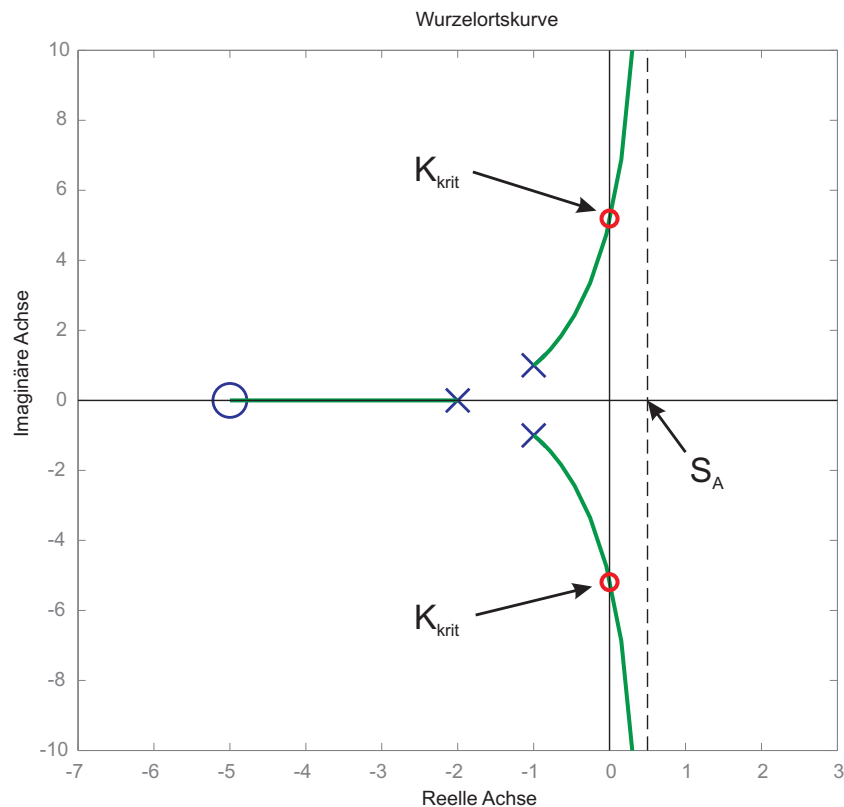
$$\Psi_l = (1 + 2l) \cdot \frac{180^\circ}{n - m}, \quad l = 0, 1 \dots n - m - 1$$

$$\Rightarrow \boxed{\Psi_0 = 90^\circ}, \quad \boxed{\Psi_1 = 270^\circ (-90^\circ)}$$

Für den Asymptotenschnittpunkt s_A erhält man:

$$s_A = \frac{\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^m n_i}{n - m} \Rightarrow s_A = \frac{-2 - 1 + i - 1 - i - (-5)}{3 - 1} = \frac{-4 + 5}{2} \Rightarrow \boxed{s_A = \frac{1}{2}}$$

c) Die Wurzelortskurve ist im nachfolgenden Diagramm dargestellt.



d) Die Äste der Ortskurve verlassen ab der kritischen Verstärkung K_{krit} die linke Halbebene, und somit den Bereich in dem der Regelkreis stabil ist.

Aufgabe 3: Stabilität eines Regelkreises

a) Der verwendete Regler ist ein (idealer) PD-Regler (Parallelschaltung von proportionalem und differenzierendem Glied). 1

b) Die Instabilität ergibt sich aus den Polen der Übertragungsfunktion $G_S(s)$, die beide in der positiven s-Halbebene liegen ($p_1 = +1,5$ und $p_2 = +2$). Weiterhin hat die Strecke auch noch eine Nullstelle, die in der positiven s-Halbebene liegt ($n = +0,5$), daher ist die Strecke nichtphasenminimal. 2

c) Bei instabilen Regelstrecken ist eine Mindestverstärkung im geschlossenen Regelkreis nötig, damit eine Stabilisierung erzielt werden kann. Bei nichtphasenminimalen Systemen führt aber andererseits eine hohe Regelkreisverstärkung wiederum immer zur Instabilität. Daher sind beidseitige Begrenzungen der Reglerparameter zu erwarten. 4

d) Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises lautet:

$$G_0(s) = \frac{(K_P + K_D \cdot s)(s - 0,5)}{(s - 1,5)(s - 2)} = \frac{K_D s^2 + (K_P - 0,5K_D)s - 0,5K_P}{s^2 - 3,5s + 3} = \frac{Z_0(s)}{N_0(s)}$$

$$G_W(s) = \frac{Z_0(s)}{N_0(s) + Z_0(s)} = \frac{K_D s^2 + (K_P - 0,5K_D)s - 0,5K_P}{s^2 - 3,5s + 3 + K_D s^2 + (K_P - 0,5K_D)s - 0,5K_P}$$

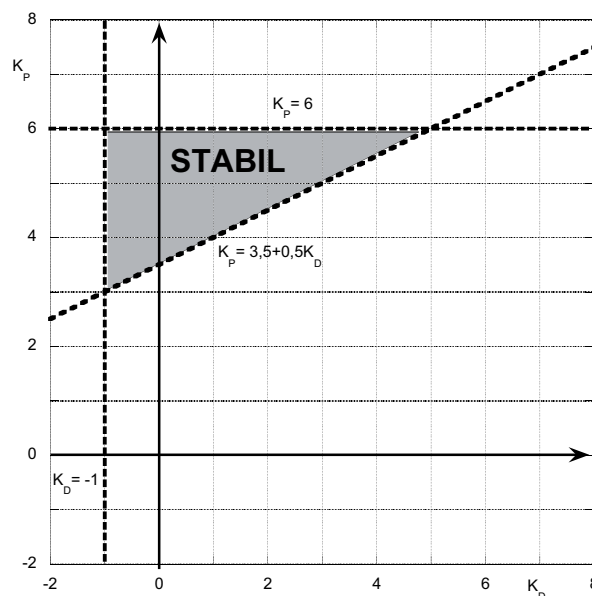
$$\Rightarrow G_W(s) = \frac{K_D s^2 + (K_P - 0,5K_D)s - 0,5K_P}{(K_D + 1)s^2 + (K_P - 0,5K_D - 3,5)s + 3 - 0,5K_P}$$
5

e) Für Systeme 2. Ordnung ist nur das notwendige Hurwitzkriterium zu prüfen. D.h. für alle Koeffizienten c_i des Nennerpolynoms $c_2 s^2 + c_1 s + c_0$ von $G_W(s)$ muss gelten: $c_i > 0$. 1

$$c_2 : K_D + 1 > 0 \Leftrightarrow K_D > -1$$

$$c_1 : K_P - 0,5K_D - 3,5 > 0 \Leftrightarrow K_P > 3,5 + 0,5K_D$$

$$c_0 : 3 - 0,5K_P > 0 \Leftrightarrow K_P < 6$$
4



- f) Es gilt für den Endwert der Sprungantwort $h(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{s} H(s) \right) = \lim_{s \rightarrow 0} G_W(s)$ (Stabilität vorausgesetzt).

$$h(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{K_D s^2 + (K_P - 0,5K_D)s - 0,5K_P}{(K_D + 1)s^2 + (K_P - 0,5K_D - 3,5)s + 3 - 0,5K_P} \right)$$

$$h(t \rightarrow \infty) = \frac{-0,5K_P}{3 - 0,5K_P} \Leftrightarrow \boxed{h(t \rightarrow \infty) = \frac{1}{1 - \frac{6}{K_P}}} \quad [3]$$

- g) Im stationären Zustand klingt der D-Anteil des Reglers stets auf Null ab und hat daher keinen Einfluss auf den Endwert (differenzierende Glieder erzeugen ein Signal proportional zur Änderung des Eingangssignals. Wenn das Eingangssignal stationär wird, also sich nicht mehr ändert, strebt der Ausgang des D-Gliedes gegen Null). Daher entfällt K_D in der Lösung. [2]

- h) Der Endwert $h(t \rightarrow \infty)$ strebt nur für $K_P \rightarrow \pm\infty$ gegen 1, bzw. der Regelfehler gegen Null, anderenfalls erhält man einen bleibenden Regelfehler. Dies sind jedoch keine sinnvollen Reglerparameter, denn für $K_P \rightarrow \pm\infty$ ist der Regelkreis instabil.

Um den bleibenden Regelfehler bei einem Führungssprung zu vermeiden, muss ein integrierender Anteil (I-Anteil) in der Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises vorhanden sein. Da die Regelstrecke keinen I-Anteil enthält, muss in den Regler ein I-Anteil eingefügt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Vorfilters (verbessert allerdings nur das Führungs- und nicht das Störverhalten). [3]

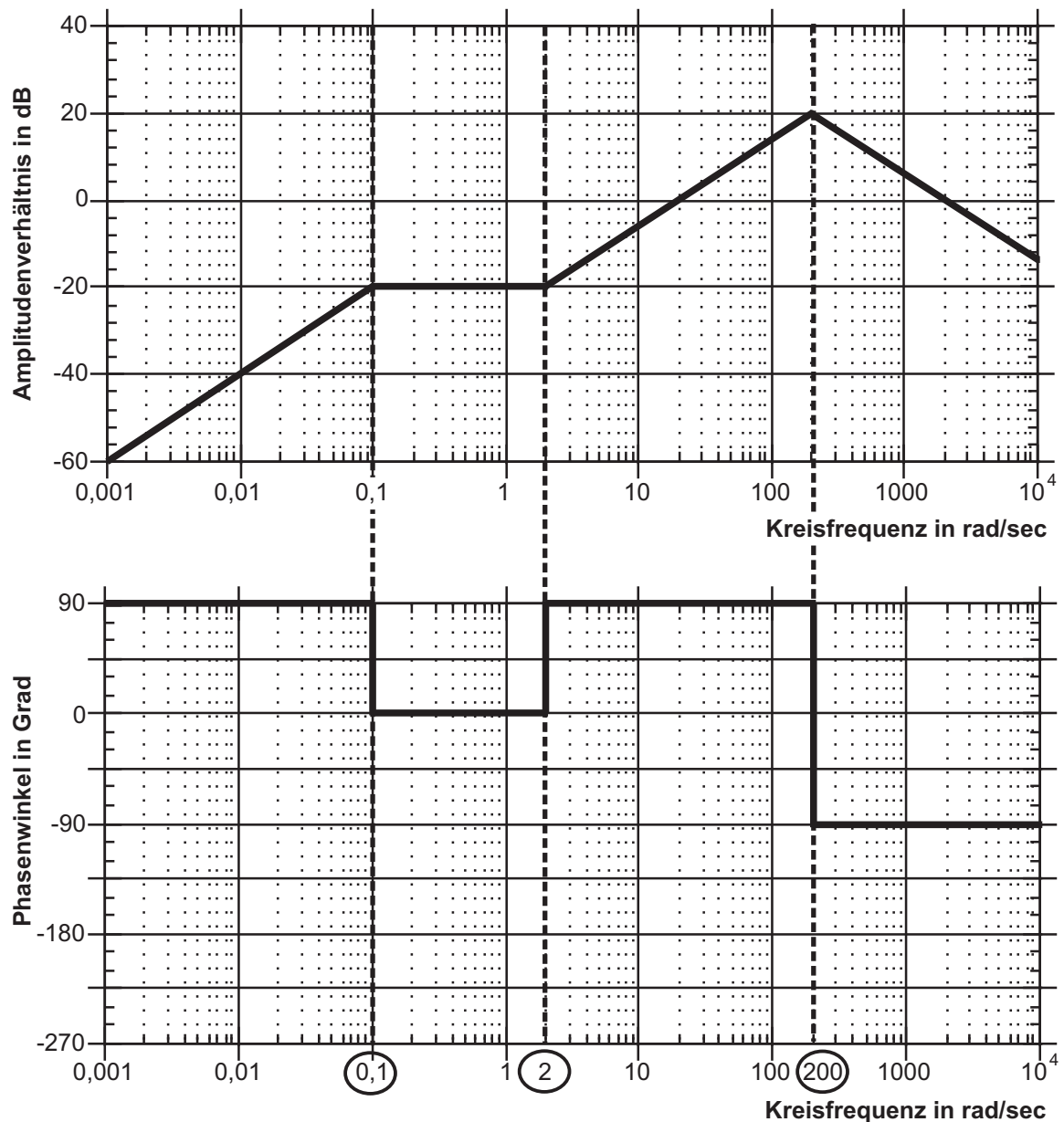
Σ 30

Aufgabe 4: Frequenzgang einer Übertragungsfunktion

- a) Sortiert nach steigender Eckfrequenz ω_e lauten die Pole und Nullstellen der Übertragungsfunktion sowie die Asymptotensteigungen:

$\omega_{e1} = 0 \text{ sec}^{-1}$	Nullstelle bei $s=0$	+20 dB/Dek.	+90°	2
$\omega_{e2} = 0,1 \text{ sec}^{-1}$	Polstelle bei $s=-0,1$	0 dB/Dek.	0°	2
$\omega_{e3,4} = 2 \text{ sec}^{-1}$	Nullstelle bei $s=-2$	+20 dB/Dek.	+90°	2
$\omega_{e5} = 200 \text{ sec}^{-1}$	Doppelpolstelle bei $s=-200$	-20 dB/Dek.	-90°	2

Mit +20 dB/Dek. beginnt das Amplitudenverhältnis. Daran erkennt man, dass die Übertragungsfunktion globales D-Verhalten besitzt und man liest man die Verstärkung $k_{G(s)} = 1$ (entspricht 0 dB) an der Verlängerung des Amplitudengangs bei $\omega = 1 \text{ sec}^{-1}$ ab.



b) Übertragungsfunktion $G(s)$ und Teilterglieder:

$$G(s) = \frac{s(1 + \frac{1}{2}s)}{(1 + 10s) \left(1 + \frac{1}{200}s\right)^2} \quad \boxed{5}$$

$\omega_{e1} = 0 \text{ sec}^{-1}$	D-Glied	$\boxed{1}$
$\omega_{e2} = 0,1 \text{ sec}^{-1}$	PT ₁ -Glied	$\boxed{1}$
$\omega_{e3,4} = 2 \text{ sec}^{-1}$	PD-Glied	$\boxed{1}$
$\omega_{e5} = 200 \text{ sec}^{-1}$	PT ₂ -Glied	$\boxed{1}$

c) Asymptotischer Phasengang: siehe Diagramm

$\boxed{4}$

d) Bei der **Frequenzgangortskurve I** liegt **globales D-Verhalten** vor, da die Ortskurve im Ursprung beginnt. Bei der **Frequenzgangortskurve II** liegt **globales I-Verhalten** vor, da die Ortskurve im Unendlichen beginnt. Bei der **Frequenzgangortskurve III** liegt **globales P-Verhalten** vor, da die Ortskurve bei einer Verstärkung von $k \approx 1$ beginnt.

$\boxed{3}$

Die Frequenzgangortskurve I passt zur Übertragungsfunktion $G(s)$, da sie als einzige im Ursprung beginnt und den Phasenwinkel von -90° nicht unterschreitet.

$\boxed{1}$

e) Das System besitzt globales D-Verhalten, weil:

- die logarithmische Frequenzkennlinien für $\omega \rightarrow 0$ eine Asymptotensteigung von $+20 \text{ dB}$ bzw. einen Phasenwinkel von $+90^\circ$ aufweisen.
- die Frequenzgangortskurve im Ursprung beginnt.
- in der Übertragungsfunktion eine Nullstelle bei $s = 0$ existiert.

$\boxed{1}$

$\boxed{1}$

$\boxed{1}$

$\boxed{\sum 30}$